

Р.А. Турганова<sup>1,2\*</sup> , Р.Н. Тулеева<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup> К. Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институты, Сәтбаев университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup> Жетілдірілген материалдар ғылыми-зерттеу институты, Алматы, Қазақстан

\*e-mail: ronagul.turganova@gmail.com

## БАКТЕРИЯЛЫҚ ЦЕЛЛЮЛОЗАНЫ АЛУ ЖӘНЕ ТАЗАРТУ ӘДІСТЕРІНІҢ ТИІМДІЛІГІ, ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ӘСЕРІ ЖӘНЕ ҚОЛДАНБАЛАРЫ ТҰРҒЫСЫНАН САЛЫСТЫРМАЛЫ ШОЛУ

Бактериялық целлюлоза өсімдік текті целлюлозаға балама болып табылатын, жоғары тазалығы, кристалдылығы және биосәйкестілігімен ерекшеленетін микробтық биополимер. Бұл материалдың құрылымдық және функционалдық қасиеттері оны медицина, тағам қаптамасы, тоқыма және композиттік материалдар сияқты әртүрлі салаларда қолдануға мүмкіндік береді. Зерттеуде бактериялық целлюлоза өндіруде қолданылатын негізгі микробтық штаммдар мен қоректік орталар, сондай-ақ ауылшаруашылық және өнеркәсіптік қалдықтарды көміртек көзі ретінде пайдалану мүмкіндіктері сипатталады. Тазарту әдістері (сілтілік өңдеу, беттік-белсенді заттар, ферменттік және физикалық тәсілдер) тиімділік, экологиялық жүктеме және соңғы қолдану саласына сәйкестік тұрғысынан салыстырмалы түрде қарастырылады. Салыстырмалы талдау нәтижелері көміртек көзі мен штамм таңдау, сондай-ақ тазарту әдісін бейімдеу арқылы өндіріс өнімділігі мен тазалық деңгейін арттыруға болатынын көрсетеді. Биоыдырайтын реагенттер мен қалдықсыз технологияларды енгізу бактериялық целлюлоза өндірісінің тұрақтылығын арттыруда маңызды рөл атқарады. Шолу мақаласында өмірлік циклдік бағалау, экологиялық қауіпсіздік, өндіріс шығындары мен соңғы қолдану талаптарын ескере отырып, бактериялық целлюлозаны өнеркәсіптік деңгейде қолдану үшін қажетті технологиялық шешімдер мен болашақ бағыттар жүйелі түрде қарастырылады.

**Түйін сөздер:** бактериялық целлюлоза; тазарту әдістері; өндіріс тиімділігі; экологиялық тұрақтылық; қолдану салалары.

R.A. Turganova<sup>1,2\*</sup>, R.N. Tuleyeva<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical and Biochemical Engineering, K. Turysov Institute of Geology and Oil-Gas Affairs, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Institute for Advanced Materials Research, Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: ronagul.turganova@gmail.com

### Comparative review of the efficiency, environmental impact, and applications of bacterial cellulose production and purification methods

Bacterial cellulose is a microbial biopolymer that serves as an alternative to plant-derived cellulose, distinguished by its high purity, crystallinity, and biocompatibility. The structural and functional properties of this material enable its application in various fields such as medicine, food packaging, textiles, and composite materials. This study describes the main microbial strains and nutrient media used in bacterial cellulose production, as well as the potential use of agricultural and industrial waste as carbon sources. Purification methods (alkaline treatment, surfactants, enzymatic, and physical approaches) are comparatively reviewed in terms of efficiency, environmental impact, and suitability for end-use applications. The comparative analysis indicates that selecting appropriate carbon sources and microbial strains, along with optimizing purification methods, can enhance production yield and cellulose purity. The adoption of biodegradable reagents and zero-waste technologies plays a critical role in improving the sustainability of bacterial cellulose production. This review systematically explores technological solutions and future directions necessary for industrial-scale applications of bacterial cellulose, considering life cycle assessment, environmental safety, production costs, and end-use requirements.

**Keywords:** bacterial cellulose; purification methods; production efficiency; environmental sustainability; application fields.

Р.А. Турганова<sup>1,2\*</sup>, Р.Н. Тулеева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Университет Лотарингии, Нанси, Франция

<sup>2</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

\*e-mail: ronagul.turganova@gmail.com

### Сравнительный обзор эффективности, экологического воздействия и применений методов получения и очистки бактериальной целлюлозы

Бактериальная целлюлоза это микробно синтезируемый биополимер, представляющий собой альтернативу целлюлозе растительного происхождения и отличающийся высокой степенью чистоты, кристалличностью и биосовместимостью. Структурные и функциональные свойства этого материала обеспечивают его применение в различных областях, таких как медицина, упаковка пищевых продуктов, текстиль и композиционные материалы. В настоящем исследовании рассматриваются основные микробные штаммы и питательные среды, используемые для получения бактериальной целлюлозы, а также возможности использования сельскохозяйственных и промышленных отходов в качестве источников углерода. Методы очистки (щелочная обработка, применение поверхностно-активных веществ, ферментативные и физические подходы) рассматриваются в сравнительном аспекте с точки зрения эффективности, экологической нагрузки и соответствия конечным областям применения. Сравнительный анализ показывает, что выбор подходящих углеродных источников и штаммов, а также оптимизация методов очистки позволяют повысить выход продукции и степень чистоты целлюлозы. Использование биоразлагаемых реагентов и безотходных технологий играет ключевую роль в повышении устойчивости производства бактериальной целлюлозы. В обзоре систематически рассматриваются технологические решения и перспективные направления, необходимые для промышленного применения бактериальной целлюлозы с учетом оценки жизненного цикла, экологической безопасности, производственных затрат и требований конечного использования.

**Ключевые слова:** бактериальная целлюлоза, методы очистки, эффективность производства, экологическая устойчивость, области применения.

#### Кіріспе

Бактериялық целлюлоза (БЦ) *Acetobacteraceae* тұқымдасына жататын бірнеше бактериялар (әсіресе *Komagataeibacter* түрлері) түзетін, ерекше тазалығы және механикалық қасиеттерімен танымал  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4)-глюканның тұратын экстрацеллюлярлы биополимер табылады [1]. Өсімдік целлюлозасымен салыстырғанда, БЦ құрамында лигнин мен гемицеллюлоза болмайды, бұл оның бөліну процесін едәуір жеңілдетеді. Өсіру ортасында БЦ ылғалданған қабықша немесе талшықты тор түрінде қалыптасады және қоректік ортадан оңай ажыратылады [2]. БЦ-ның жоғары табиғи тазалығы мен биосәйкестілік қасиеттері оны биомедициналық қолданбаларда, сондай-ақ жоғары құрылымдық беріктік талап етілетін салаларда болашағы бар биоматериал ретінде қарастыруға мүмкіндік береді [3]. Шынында да, жоғары кристалдылығы, созылу беріктігі, ылғал ұстау қабілеті және биосәйкестілігі сияқты бірегей қасиеттерінің арқасында БЦ жараны тану материалдарында, тіндік тірек құрылымдарында, дәрілік заттарды жеткізу жүйелерінде, сондай-ақ тағам, тоқыма, қаптама және композиттік өнімдер өндірісінде кеңінен қолданылады [4]. Алайда, жоғары бастапқы тазалыққа қарамастан, әсіресе медициналық мақсаттарға

арналған БЦ қалдық жасушалардан, ақуыздардан және эндотоксиндерден мұқият тазартуды қажет етеді. Дәстүрлі тазарту әдістері (мысалы, сілтілік ерітіндіде қайнату) бактериялық жасушаларды тиімді түрде лизиске ұшыратса да, бұл процесс сілтілік қалдықтардың түзілуімен қатар жүреді және көп мөлшерде сумен шайып тазартуды талап етеді [5,6]. Қазіргі зерттеулер өндіріс тиімділігі мен өнім сапасын сақтай отырып, қоршаған ортаға әсерді азайтатын жасыл балама әдістерді іздеуде. Мысалы, биобдырайтын беттік-белсенді заттар және аса сығылған көмірқышқыл газы секілді заманауи технологиялар дәстүрлі қатты химиялық реагенттердің орнын басуға немесе толықтыруға ұсынылуда [7]. Бұл шолуда БЦ-ның алыну және тазартылу әдістері жүйелі түрде салыстырылып, олардың тиімділігі, қоршаған ортаға әсері және қолдану саласына қойылатын талаптар бойынша талданады. Алдымен өндіріс жолдары мен тазарту хаттамалары баяндалып, кейін кестелер түрінде салыстырмалы деректер ұсынылады. Қосымша мысалдар түрлі өндірістік шешімдердің БЦ-ның қолдану салаларына әсерін көрсетеді. Сонымен қатар шикізат ретінде өндірістік қалдықтарды пайдалану, өмірлік цикл талдауы және өндірістің тұрақтылығын арттыру бағыттары талқыланып, болашақ даму бағыттары ұсынылады.

**Бактериялық целлюлозаны өндіру және бөліп алу әдістері**

БЦ әдетте сірке қышқылды бактериялар (acetic acid bacteria) арқылы статикалық немесе араластырылған (динамикалық) дақылдарда өндіріледі [8]. Ең тиімді БЦ продуценттері ретінде *Komagataeibacter* туысына жататын *K. xylinus*, *K. hansenii*, *K. rhaeticus* және *K. sucrofermentans* түрлері кеңінен танылған [9,10]. Статикалық жағдайда ферментация кезінде БЦ ауа сұйықтық шекарасында желе тәрізді қабықша (пелликула) ретінде түзіледі, ал араластырылған жағдайда БЦ суспензия түрінде (флоктар немесе шашыраңқы талшықтар) қалыптасады [11]. Өсіру ортасы ретінде жиі қолданылатын стандартты қоректік орта Hestrin Schramm (HS), құрамында глюкоза бар сұйық қоректік ерітінді болып табылады [12]. Алайда соңғы жылдары өндіріс шығындарын азайту үшін әртүрлі арзан баламалар қолданылып жүр, олардың қатарына жеміс қалдықтары, меласса, ауылшаруашылық субстраттар мен өзге де органикалық қалдықтар жатады [13-15]. Ферментация үрдісі әдетте 1–2 аптаға созылады. Осы кезеңнен кейін түзілген БЦ қабаты жиналады, бұл процесс қолмен немесе центрифугалау арқылы жүзеге асады [16]. Жиналғаннан кейін артық ылғалды кетіру үшін өнім сығылады. Шикі БЦ құрамында бактериялық жасушалар мен өсу ортасының қалдықтары сақталады. Сондықтан экстракция кезеңінде физикалық бөлу әдістері пайдаланылады, мысалы, центрифугалау немесе сүзу арқылы БЦ қабығын бөліп алу. Осыдан кейін ылғалды целлюлоза қабаты арнайы химиялық немесе биологиялық өңдеуден өтеді, бұл талшық құрылымын босатып, өнімді тазартуға бағытталған [17,18].

**Бактериялық целлюлозаны тазарту әдістері**

БЦ тазартудың басты мақсаты бактериялық жасушаларды, ақуыздарды, ДНҚ-ны, пигменттерді және өсу ортасының басқа да компоненттерін целлюлозалық матрицаны зақымдамай жою болып табылады [19]. Ең жиі қолданылатын тәсіл БЦ-ны сұйылтылған натрий гидроксиді (NaOH) ерітіндісінде қайнату немесе сіңдіру. NaOH бактериялық жасуша қабықшасын ыдыратып, ақуыздарды денатурациялайды [20]. Мысалы, БЦ пелликуласын 0.1–1 N NaOH ерітіндісінде 60–100 °C температурада 20–60 минут қайнату ақуыз құрамын бастапқы мөлшерінің бірнеше пайызынан ғана қалдырады. Бұл өңдеуден кейін өнімді мұқият шаю қажет (көбі-

несе бейтарап рН-қа дейін) қалған сілтіні және еріген қалдықтарды кетіру үшін. Қажет болған жағдайда, өнімді ағарту үшін сутек асқын тотығы (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) немесе натрий гипохлориті (NaClO) қолданылады. Бұл тотығу қадамы қалдық пигменттерді жоюға бағытталған [21,22].

Иондық және ионсыз беттік-белсенді заттар липидтер мен ақуыздарды еріту қабілетіне ие. Мысалы, анионды SDS (натрий додецил сульфаты) және ионсыз Triton X-100 әдетте тіндерді деклетизациялауда қолданылады, алайда БЦ тазартуда да тиімділігі дәлелденген [21,23]. Зерттеулерге сәйкес, 2% SDS ерітіндісінде 60 °C-та 3 сағат өңделген БЦ үлгілерінде ~94% ақуыз жойылған. Алайда, SDS және осыған ұқсас синтетикалық заттар биоыдырамайтын болғандықтан, оларды пайдаланғаннан кейін де ұзақ әрі мұқият шаю қажет [23,24]. Соңғы жылдары бұл кемшілікті жою мақсатында табиғи майлар негізінде алынған биоыдырайтын беттік-белсенді заттарды қолдану ұсынылуда. Мысалы, натрий кокоил изетионаты (SCI) немесе децилглюкозид сияқты қосылыстардың тиімділігі зерттелуде. Атап айтқанда, 60 °C температурада 3 сағат бойы SCI ерітіндісімен өңделген БЦ үлгілерінен ақуыздың шамамен 84%-ы тиімді түрде алынғаны көрсетілген [23,25,26].

Протеолитикалық ферменттер (мысалы, трипсин, папаин) ақуыз қалдықтарын жұмсақ жағдайда ыдыратуға мүмкіндік береді. Бұл тәсіл әсіресе тіндік тірек құрылымдарын стерильдеуде кең таралғанымен, БЦ тазарту саласында әлі жеткілікті зерттелмеген. Ферменттік әдістің артықшылығы оның жоғары селективтілігінде, яғни целлюлозаны бұзбай, тек ақуыздарды ыдыратады. Алайда бұл процесс ұзақ уақыт пен нақты бақылауды талап етеді [27,28]. Жаңаша бағыттардың бірі аса сығылған көмірқышқыл газы (scCO<sub>2</sub>) арқылы өңдеу. Жоғары қысымдағы CO<sub>2</sub> БЦ құрылымына еніп, бактерияларды инактивациялап, химиялық қалдықсыз стерильдеуді қамтамасыз ете алады [29,30]. Pigaleva және әріптестері жүргізген зерттеуде scCO<sub>2</sub> көмегімен БЦ-ның ішінде қалған жасушалардың сыртқы қабықшалары жойылып, эндотоксин деңгейі едәуір төмендетілген. Дегенмен, бұл әдіспен медициналық стандарттарға толық сәйкес тазарту әлі қол жеткізілген жоқ, әрі арнайы құрал-жабдықты талап етеді [31]. Басқа физикалық әдістер (мысалы, мұздатып еріту циклдары, ультрадыбыстық өңдеу) талшықтарды дисперсиялау үшін зерттелгенімен, олар кеңінен стандартталмаған.

БЦ тазарту бірнеше дәйекті кезеңнен тұрады және алынған өнімнің сапасын, функционалдық қасиеттерін айқындайтын маңызды технологиялық қадам болып табылады (1-сурет). Бастапқы шаю кезеңінде БЦ пелликуласы ферментация ортасынан бөлініп алынып, дистилденген немесе деиондалған сумен жуылады. Бұл қадам өсу ортасының қалдықтарын (қант, органикалық қышқылдар, тұздар) жоюға бағытталған және келесі тазарту кезеңдерінің тиімділігін арттырады [32]. Негізгі өңдеу кезеңі бактериялық жасушалар мен акуыздардың жойылуын қамтамасыз етеді. Бұл сатыда БЦ-ға сілтілік ерітінділер (мысалы, NaOH) немесе беттік-белсенді заттармен (мысалы, SDS, Triton X-100 немесе биоыдырайтын детергенттер) бір немесе бірнеше рет әсер ету жүзеге асы-

рылады. Қолданылатын реагенттің түрі мен концентрациясы, сондай-ақ өңдеу уақыты, БЦ-ның тазалық деңгейіне және соңғы қолдану саласына байланысты таңдалады. Қайта шаю кезеңінде БЦ үлгілері бейтарап рН мәніне дейін бірнеше рет жуылады. Бұл кезең реагенттердің қалдықтарын, еріген лизаттарды және ыдырау өнімдерін толығымен жоюға бағытталған. Кептіру кезеңі соңғы өнімді тұрақтандыру және сақтау қасиеттерін қамтамасыз ету мақсатында жүргізіледі. Тиісті кептіру әдістеріне вакуумдық кептіру, мұздатып кептіру немесе төмен температурада конвективті кептіру жатады. Таңдалған әдіс өнімнің құрылымдық және функционалдық қасиеттеріне әсер етуі мүмкін, сондықтан оны қолдану мақсатына сәйкес бейімдеу қажет [33,34].



**1-сурет** – Бактериялық целлюлозаны ауылшаруашылық қалдықтарынан өндіру және тазарту қадамдары.

(А) Бактериялық целлюлоза өндірісі ауылшаруашылық қалдықтарын жинаудан басталады.

Бұл шикізат физикалық (ұсақтау, сүзу) және химиялық (гидролиз және алдын ала өңдеу) әдістермен дайындалып, қоректік субстратқа айналдырылады. Алынған субстраттан қоректік орта дайындалып, оған бактериялар (мысалы, *Komagataeibacter* spp.) инокуляцияланады. Ферментация нәтижесінде пайда болған

БЦ арнайы құрылғылар арқылы жиналады. (Ә) Тазарту кезеңінде жиналған БЦ алдымен бастапқы шаюдан өтеді, содан соң химиялық реагенттер (NaOH, детергенттер) көмегімен өңделіп, микроорганизмдер мен акуыз қалдықтарынан тазартылады. Бұдан кейін бірнеше қайта шаю сатылары жүргізіліп, соңында БЦ өнімінің құрылымын сақтау үшін кептіріледі.

Ескерту: Сурет BioRender көмегімен жасалды, лицензия нөмірі: TX28H9XR8U

### **Бактериялық целлюлоза өндірісінің тиімділігі: әдістерді салыстырмалы бағалау**

БЦ өндірісі тиімділігі қолданылатын штаммның ерекшелігіне, көміртек көзіне және өсу жағдайларына тікелей байланысты. *Komagataeibacter xylinus* штаммы HS қоректік ортасында статикалық жағдайда өсірілгенде, әдетте, бір апта ішінде 0.5–2.0 г/л аралығында БЦ түзеді [35,36]. Әртүрлі зерттеулерден алынған өнім шығымдары 1-кестеде салыстырмалы түрде келтірілген. Айта кетерлік жайт балама-

лы көміртек көздерін қолдану БЦ өнімділігін едәуір арттырады. Мысалы, *Gluconacetobacter xylinus* сахароза (20 г/л) немесе глицерин негізіндегі ортада 3.8 г/л-ге дейін өнім берген, бұл глюкозаға қарағанда әлдеқайда жоғары көрсеткіш [37]. Сол сияқты, өсу ортасын өнеркәсіптік қалдық гидролизаттарымен (мысалы, жеміс қабықтары) толықтыру немесе алмастыру да оң нәтиже береді. Мәселен, *Achromobacter* S3 штаммы манго қабығының қалдықтарын пайдалану арқылы 1.22 г/л БЦ өндірген, бұл

стандартты HS ортасымен салыстырғанда (0.52 г/л) 2.5 есе артық [36]. Бұған қоса, бейімделген эволюция және генетикалық инженерия әдістері өндірісті тиімді арттыруға мүмкіндік береді. Мысалы, маннитолда бейімделген *K. xylinus* штаммы 3.43 г/л БЦ синтездеген, ал бұл ата-аналық глюкоза ортасындағы штамм үшін шамамен 1.7–2.3 г/л ғана болған [35]. Сонымен қатар, *K. sucrofermentans* штаммында глюкоза дегидрогеназа генін инактивациялау және эта-

нол қосу арқылы БЦ өнімділігі ~0.25 г/л-ден 2.0 г/л-ге дейін артқан [38]. Жалпы алғанда, заманауи әдістер көміртек көзін оңтайландыру, корректік ортаның құнын төмендету және штамм метаболизмін бағыттап өзгерту арқылы БЦ өнімділігін бірнеше есе арттыруға мүмкіндік береді. Өндірістік тиімділікке қол жеткізудегі негізгі факторлар көміртек көзін белсенді игеру мен оның целлюлоза синтезіне бағытталған ағынын күшейту [38,39].

1-кесте – Әртүрлі көміртек көздері мен бактериялық штаммдарға байланысты БЦ өнімділігі

Көміртек көзі / Шикізат	Бактериялық штамм	БЦ өнімділігі (г/л)	Сілтеме
Синтетикалық HS ортасы (глюкоза)	<i>Achromobacter</i> S3	0.52 (базальдық деңгей)	[36]
Манго қабығы гидролизаты (агроқалдық)	<i>Achromobacter</i> S3	1.22 (2.5× HS)	[36]
Сахароза (20 г/л)	<i>G. xylinus</i> ATCC 53524	3.83	[37]
Глицерин (20 г/л)	<i>G. xylinus</i> ATCC 53524	3.75	[37]
Маннитол (бейімделген ALE-штамм)	<i>K. xylinus</i> K2G30 (adapted)	3.43	[35]
Глюкоза + этанол (HS + 1% EtOH)	<i>K. sucrofermentans</i> KS003	1.99	[38]

Ескертпе: ALE – adaptive laboratory evolution (бейімделген лабораториялық эволюция); өнімділік мәндері сәйкес әдебиет көздерінен алынған.

### Тазарту тиімділігі және экологиялық әсері

БЦ тазарту тиімділігі өнімнен ақуыз және ДНҚ қалдықтарының қаншалықты толық жойылғанына қарай бағаланады. Сілтілік өңдеу (0.1–1 М NaOH, 60–100 °С) ең жоғары тиімділік көрсеткен әдістердің бірі [40]. Мысалы, Nikbakht және әріптестері жүргізген зерттеуде NaOH ерітіндісімен өңделген БЦ-да бастапқы ақуыздың тек 3%-ы (яғни 96.4% жойылған), ал ДНҚ-ның 2.2%-ы (97.8%) қалған [21]. Синтетикалық детергенттер де жоғары тиімділік көрсеткен 2% DS ерітіндісімен 60 °С-та өңделген жағдайда ~94% ақуыз және ~88% ДНҚ алынған. Ал биодырайтын беттік-белсенді зат SCI шамамен 84% ақуыз және 86% ДНҚ жойылуын қамтамасыз еткен [21,41]. Салыстыру үшін, тек су (қайнату) арқылы өңдеу кезінде кейбір ластаушылар жойылғанымен, бұл нәтиже сілті немесе беттік-белсенді заттармен салыстырғанда айтарлықтай төмен [42]. Экологиялық тұрғыдан алғанда NaOH қолдану белгілі бір мәселелер туындатады сілтілік ағындарды бейтараптандыру қажет әрі қыздыру үшін қосымша энергия жұмсалады [43,44]. Синтетикалық детергенттер (мысалы, SDS немесе Triton X-100) тұрақты экологиялық ластаушылар болып саналады [45]. Ал өсімдік майларынан алынған биодырайтын детергенттер экологиялық тұр-

ғыда анағұрлым қауіпсіз балама болып табылады [46]. Аса сығылған көмірқышқыл газы (scCO<sub>2</sub>) қолданылған тазарту әдісі жасыл химия тұрғысынан тиімді шешім [47,48]. Бұл әдісте еріткіш қалдықтары болмайды, бірақ тазарту тиімділігі орташа деңгейде деп бағаланады.

### Қолдану саласына қарай бактериялық целлюлозаға қойылатын талаптар

БЦ тазалығы мен соңғы формасы оның қолданылатын саласына тікелей байланысты. Әсіресе, биомедициналық қолдану үшін стерильдік пен биологиялық ластаушылардың болмауы негізгі талаптар [49,50]. Тіпті өте аз мөлшердегі эндотоксин де иммундық реакцияларды тудыруы мүмкін, сондықтан қатаң стерильдеу әдістері (мысалы, автоклавтау немесе γ-сәулемен өңдеу) және эндотоксиндерді толық жою шаралары міндетті түрде жүргізілуі тиіс [51].

БЦ-ның жоғары су мөлшері мен кеуектілігі оны жараларды таңуға және шеміршекке ұқсас құрылымдарды жасауға өте қолайлы етеді. Сонымен қатар, оның жоғары кристалдылығы мен созылуға беріктігі композитті материалдар мен электрондық құрылғыларда қолдануға мүмкіндік береді [52]. Тағам қаптамасы мен тағаммен жанасатын материалдар үшін тазалыққа қойы-

латын талаптар салыстырмалы түрде төмен бұл жағдайда қалған биохимиялық заттар әдетте қауіпсіз болып есептеледі. Бұл салаларда БЦ-ның қабықша түзуші қабілеті мен оттегі өткізбейтін қасиеттері жоғары бағаланады. Дегенмен, өндірістің өзіндік құны бұл салалардағы кең қолдануға елеулі кедергі болып отыр [53,54]. Көп жағдайда, БЦ полимерлермен араластырылады немесе талшықтарға жабыстырылады, бұл оның механикалық беріктігі мен газға өткізбейтіндігін жақсартады. БЦ-ның нанопибрилдері композиттік материалдың қаттылығын арттырып, өтімділігін азайтады [55]. Тоқыма және композиттік материалдарда БЦ әдетте күшейткіш талшық немесе гель түрінде қолданылады. Мысалы, ол иірім жіптердің бетіне қабықша түрінде қалыптасып, теріге ұқсас парақтарға қалыптастырылуы мүмкін. Оның жоғары кристалдылығы мен суды сіңіру қабілеті маталарға ерекше жұмсақтық пен тыныстағыш қасиет береді. Ал композиттерде (мысалы, полиэфир немесе эпоксидті шайырлармен бірге) БЦ материалға созылу беріктігі мен қаттылық қосады [56,57]. Мұндай қолдану салаларында өңдеу кезеңіне кептіру және тығыздау жатады. Осы кезде тазарту реагенттерінің қалдықтары полимермен адгезияны төмендетуі мүмкін, сондықтан мұқият шаю бәрібір маңызды [58,59].

#### ***Бактериялық целлюлоза өндірісінің тұрақтылығы және экологиялық әсері***

БЦ өндірісінің тұрақтылығын арттыру үшін жаңартылатын шикізат көздерін пайдалану және қалдықтарды барынша азайту маңызды. Бұл бағыттағы негізгі стратегиялардың бірі ауылшаруашылық немесе өнеркәсіптік қалдықтарды көміртек көзі ретінде қолдану [60]. Мысалы, жеміс қалдықтары сәтті гидролизденіп, целлюлоза синтезін арттыратын қарапайым қанттарға айналдырылады. Мұндай қалдықтарды пайдалану бір жағынан қоқыс полигондарына түсетін қалдық көлемін азайтса, екінші жағынан шикізат құнын төмендетіп, БЦ өндірісінің экологиялық ізін қысқартады. Бұл әсіресе дәстүрлі қант өндірісімен салыстырғанда тиімді, себебі қант өндірісі көп энергия мен жер ресурстарын қажет етеді [61,62]. Өмірлік циклдік талдаулар БЦ өндірісінде қоректік ортаны дайындау жалпы экологиялық әсердің едәуір бөлігін құрайтынын көрсеткен. Сондықтан қалдық негізіндегі қоректік орта қолдану бұл көрсеткіштерді айтарлықтай жақсартады [63]. Тазарту кезеңінде қатты химиялық заттардың орнына экологиялық баламаларды қолдану ұйымды азайтудың тиімді

жолы. Сонымен қатар, аса сығылған көмірқышқыл газымен ( $scCO_2$ ) тазарту еріткіш қалдықтарын мүлде қалдырмайды, бірақ бұл әдіс жабдық жағынан қымбат болуы мүмкін [64]. Жаңашыл тәсілдер ретінде NaOH ерітіндісін қайта өңдеу немесе БЦ өндірісін ағынды суларды тазарту жүйелерімен біріктіру секілді тұйық цикл концепциялары қарастырылып жатыр. Мысалы, бір зерттеуде басқа өндірістен алынған қолданылған NaOH ерітіндісі БЦ жуу процесінен кейін қайта өңделіп, жүйе ішіндегі айналым қалыптастырылған [65,66]. БЦ өндірісінің экологиялық ізін азайту үшін айналмалы экономика қағидаттарын енгізу тиімді шешім болып табылады. Өсімдік целлюлозасымен салыстырғанда, БЦ-ның тұрақтылық әлеуеті жоғары. Дегенмен, қазіргі таңда БЦ өндірісі қымбат әрі энергия шығыны жоғары процесс болып қала береді. Сондықтан өндіріс тиімділігін арттыру үшін тұрақты түрде өмірлік циклдік бағалау жүргізу қажет [67-69].

#### ***Бактериялық целлюлоза технологиясындағы қазіргі қиындықтары және болашақ даму бағыттары***

БЦ өндірісі мен тазарту технологияларындағы елеулі жетістіктерге қарамастан, бұл саланың кең ауқымды коммерциялануы алдында бірнеше маңызды кедергілер әлі де сақталып отыр [70,71]. Өнімділікті арттыру жиі жанама мәселелермен қатар жүреді. Мысалы, жоғары өнім беретін штаммдар немесе байытылған өсу орталары глюкон қышқылы сияқты жанама метаболиттерді жинақтауы мүмкін. Бұл заттар рН деңгейін төмендетіп, процесті тұрақты ұстап тұру үшін қосымша бақылауды қажет етеді [72]. Үлкен көлемдегі ферменттерлерде (араластырылатын немесе ауамен үрлейтін жүйелер) тұрақты және жоғары өнімділікке қол жеткізу оңай емес. БЦ синтезі оттегінің мөлшеріне және механикалық қысымға өте сезімтал, сондықтан өндіріс көлемін арттыруда инженерлік қиындықтар туындайды (2-сурет) [73].

Экономикалық тұрғыдан, БЦ қазіргі кезде өсімдік целлюлозасымен салыстырғанда едәуір қымбат. Бұл ең алдымен өсу ортасының құны мен кейінгі өңдеу (тазарту, стерильдеу) процестерінің күрделілігімен байланысты [74]. Мәселені шешу үшін процесті интенсификациялау (мысалы, жасушаларды иммобилизациялау, жоғары тығыздықтағы өсіру), сондай-ақ арзан шикізатты қолдану жолдары зерттеліп жатыр. Алайда өндіріс құнының өсімдік целлюлозасына теңесуі әзірге алыс болашақтың еншісінде қалып отыр. [75]. Тазарту процесі де айтарлықтай шығынды

қажет етеді, әсіресе медициналық мақсаттағы БЦ үшін эндотоксиндерді толық жою бірнеше кезеңнен тұратын тазартуды (сілтілік өңдеу, ағарту, стерильдеу) талап етеді. Бұл өз кезегінде көп мөлшерде су және реагенттер жұмсауды білдіреді [76,77]. Экологиялық тұрғыдан, бір ластаушының орнына басқасын алмастыру қаупі де бар. Мысалы, синтетикалық беттік-белсенді заттар ақуыздарды тиімді жойғанымен, қоршаған ортада тұрақты түрде жиналып, ұзақмерзімді экологиялық жүктеме туындатады [78]. БЦ өндірісінің ғылыми-технологиялық дамуы оны функционалдық материал ретінде кеңінен қолдануға жол ашып отыр. Дегенмен, бұл бағыттағы прогресті үдету үшін бірқатар перспективалық зерттеу бағыттарын жүйелі түрде қарастыру қажет. Біріншіден, өндіріс тиімділігін арттыру биосинтездің метаболизмдік негізін терең түсінуді талап етеді [79]. Бұл орайда, метаболизмдік инженерия әдістерін қолдана отырып, БЦ синтезіне кедергі келтіретін жанама метаболиттердің (мысалы, глюкон қышқылы) түзілуін азайту және мақсатты биомасса ағынын целлюлозаға бағыттау маңызды. Сонымен қатар, штаммдарды БЦ-мен қатар целлюлаза немесе тазарту кофакторларын секретициялайтындай етіп модификациялау арқылы *in situ* өзін-өзі тазарту жүйесін қалыптастыру болашағы зор [80]. Екіншіден, тазарту және стерильдеу кезеңдеріне экологиялық балама әдістерді енгізу қажет. Қазіргі таңда қолданылатын сілтілік және хлорлы реагенттер

жоғары тиімділік көрсеткенімен, олардың экологиялық жүктемесі мен қалдықтарды бейтараптандыру қажеттілігі артады. Бұл шектеулерді еңсеру үшін қайта қолданылатын ферменттік коктейльдер, биоыдырайтын беттік-белсенді заттар және фотондық стерильдеу сияқты экологиялық қауіпсіз, энергия тиімді әдістерге көшу қажет [81,82]. Сонымен қатар, процестік инновациялар өндіріс шығындарын төмендетуге айтарлықтай ықпал етуі мүмкін. Атап айтқанда, үздіксіз ферментация жүйелері, жасушалардың иммобилизациясы, жоғары тығыздықтағы өсіру режимдері, сондай-ақ жедел тазарту жүйелері өндірістік тиімділікті арттырып, су мен энергия шығынын оңтайландыруға көмектеседі [83,84]. БЦ өндірісінің экологиялық әсерін жүйелі түрде бақылау үшін жасыл биоматериал концепциясын енгізу қажет. Бұл бағытта өмірлік циклдік талдау негізінде парниктік газдар ізі, су тұтыну деңгейі, қалдық реагенттер көлемі сынды экологиялық индикаторларға негізделген стандартталған бағалау жүйелерін әзірлеу өндірісті тұрақты дамытуға мүмкіндік береді [85]. Соңғы аспект өнеркәсіптік масштабта интеграция болып табылады. БЦ өндірісін ағынды суларды тазарту жүйелерімен, ауылшаруашылық қалдықтарды өңдеу процестерімен немесе басқа биотехнологиялық өндірістермен біріктіру арқылы тұйық циклді жүйелер құру экожүйелік әсерді азайтып, экономикалық тиімділікті арттыра алады [86,87].



2-сурет – Бактериялық целлюлоза өндірісіндегі негізгі мәселелер және оларды шешу жолдары.

Ескерту: Сурет BioRender көмегімен жасалды, лицензия нөмірі: AJ28HAGRYF

## Қорытынды

БЦ өсімдік целлюлозасына балама ретінде қарастырылатын, жаңартылатын және жоғары тазалықпен сипатталатын биоматериал. Оның ерекше функционалдық қасиеттері оны әртүрлі салаларда қолдануға мүмкіндік береді. Жүргізілген салыстырмалы талдау нәтижесінде БЦ өндірісінің тиімділігін штаммдарды оңтайландыру және арзан көміртек көздерін (әсіресе ауылшаруашылық қалдықтарын) пайдалану арқылы едәуір арттыруға болатыны анықталды. Тазарту кезеңінде дәстүрлі сілтілік өңдеу жоғары тиімділікті көрсеткенімен, соңғы жылдары экологиялық тұрғыдан қауіпсіз балама әдістер биоөндіретін беттік-белсенді заттар мен аса сығылған CO<sub>2</sub> қолдану кеңінен зерттелуде. БЦ тазарту және өндіру әдісін таңдау көбінесе оның қолдану саласына байланысты. Медициналық мақсаттағы өнімдер жоғары стерильдік пен тазалықты талап етеді, ал қаптама немесе композиттік материалдар үшін арзандатылған, қарапайым тазарту процестері жеткілікті болуы мүмкін. Жалпы алғанда, зерттеулерде тұрақтылыққа көшу тенденциясы байқалады, яғни көптеген соңғы

зерттеулерде ауылшаруашылық қалдықтарын негізге алған қоректік орта, жұмсақ реагенттер және экологиялық таза технологиялар ұсынылуда. Бұл бағыт БЦ-ның өнеркәсіптік деңгейде кеңінен қолданылуына жол ашуы мүмкін. Осы мақсатқа жету үшін биотехнологиялық процестерді жетілдіру, өмірлік циклдік ойлау жүйесін енгізу және әр қолдану саласына сәйкес тиімділік, тазалық және экологиялық әсерді кешенді бағалау негізгі қағидаттар болып қала береді.

## Қаржыландыру туралы мәлімдеме

Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан BR27199103 нөмірлі грант аясында қаржыландырылды.

## Алғыс және мүдделер қайшылығы туралы мәлімдеме

Авторлар зерттеуге қолдау көрсеткен барлық серіктестер мен мекемелерге алғыс білдіреді. Авторлар арасында мүдделер қайшылығы жоқ.

## Әдебиеттер

1. Potočnik V., Gorgieva S., Trček J. From nature to lab: sustainable bacterial cellulose production and modification with synthetic biology // *Polymers*. – 2023. – Vol. 15, No. 16. – Art. 3466. – DOI: 10.3390/polym15163466.
2. Dogaru A.I., Oprea O.C., Isopencu G.O., Banciu A., Jinga S.I., Busuioc C. Bacterial cellulose-based nanocomposites for wound healing applications // *Polymers*. – 2025. – Vol. 17, No. 9. – Art. 1225. – DOI: 10.3390/polym17091225.
3. Liu W., Du H., Zheng T., Si C. Biomedical applications of bacterial cellulose-based composite hydrogels // *Current Medicinal Chemistry*. – 2021. – Vol. 28, No. 40. – P. 8319–8332. – DOI: 10.2174/0929867328666210412124444.
4. Moradian M., Nosrat Abadi M., Jafarpour D., Saadat M. Effects of bacterial cellulose nanocrystals on the mechanical properties of resin-modified glass ionomer cements // *European Journal of Dentistry*. – 2021. – Vol. 15, No. 2. – P. 197–201. – DOI: 10.1055/s-0040-1717051.
5. Popa L., Ghica M.V., Tudoroiu E.E., Ionescu D.G., Dinu-Pîrvu C.E. Bacterial cellulose – a remarkable polymer as a source for biomaterials tailoring // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, No. 3. – Art. 1054. – DOI: 10.3390/ma15031054.
6. Bektas I., Yildirim N.B. Molecular characterization of bacterial cellulose producing *Bacillus* strains isolated from soil // *Journal of Basic Microbiology*. – 2025. – Vol. 65, No. 6. – Art. e70026. – DOI: 10.1002/jobm.70026.
7. Jadczyk K., Ochędzan-Siodłak W. Bacterial cellulose: biopolymer with novel medical applications // *Journal of Biomaterials Applications*. – 2023. – Vol. 38, No. 1. – P. 51–63. – DOI: 10.1177/08853282231184734.
8. Bimmer M., Reimer M., Klingl A., Ludwig C., Zollfrank C., Liebl W., Ehrenreich A. Analysis of cellulose synthesis in a high-producing acetic acid bacterium *Komagataeibacter hansenii* // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2023. – Vol. 107, No. 9. – P. 2947–2967. – DOI: 10.1007/s00253-023-12461-z.
9. Brugnoli M., Robotti F., La China S., Anguluri K., Haghghi H., Botta S., Ferrari A., Gullo M. Assessing effectiveness of *Komagataeibacter* strains for producing surface-microstructured cellulose via guided assembly-based biolithography // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11, No. 1. – Art. 19311. – DOI: 10.1038/s41598-021-98705-2.
10. Tseng Y.S., Patel A.K., Chen C.W., Dong C.D., Singhanian R.R. Improved production of bacterial cellulose by *Komagataeibacter europaeus* employing fruit extract as carbon source // *Journal of Food Science and Technology*. – 2023. – Vol. 60, No. 3. – P. 1054–1064. – DOI: 10.1007/s13197-022-05451-y.
11. Mauro F., Corrado B., De Gregorio V., Lagreca E., Di Natale C., Vecchione R., Netti P.A. Exploring the evolution of bacterial cellulose precursors and their potential use as cellulose-based building blocks // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – Art. 11613. – DOI: 10.1038/s41598-024-62462-9.

12. Hamed D.A., Maghrawy H.H., Abdel Kareem H. Biosynthesis of bacterial cellulose nanofibrils in black tea media by a symbiotic culture of bacteria and yeast isolated from commercial kombucha beverage // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. – 2022. – Vol. 39, No. 2. – Art. 48. – DOI: 10.1007/s11274-022-03485-0.
13. Kolesovs S., Ruklisha M., Semjonovs P. Synthesis of bacterial cellulose by *Komagataeibacter rhaeticus* MSCL 1463 on whey // *3 Biotech*. – 2023. – Vol. 13, No. 3. – Art. 105. – DOI: 10.1007/s13205-023-03528-9.
14. El-Gendi H., Taha T.H., Ray J.B., Abdel-Fattah Y.R., Soliman N.A., El-Zawawy W.K. Recent advances in bacterial cellulose: a low-cost effective production media, optimization strategies and applications // *Cellulose*. – 2022. – Vol. 29. – P. 7495–7533. – DOI: 10.1007/s10570-022-04697-1.
15. Skiba E.A., Shavyrkina N.A., Skiba M.A., Mironova G.F., Budavaeva V.V. Biosynthesis of bacterial nanocellulose from low-cost cellulosic feedstocks: effect of microbial producer // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2023. – Vol. 24, No. 18. – Art. 14401. – DOI: 10.3390/ijms241814401.
16. Santos K.O., Bertolo R., de Almeida Ibanez N.L., Alves M.R., Onuma T.P., Ribeiro G.C., de Souza Porto A.J., Barbeito C.G., Pinato L., Jozala A.F., Grotto D., Hataka A. Bacterial cellulose membrane experimentally implanted in the peritoneum of Wistar rats—Inflammatory immunoreactivity and oxidative stress // *Current Issues in Molecular Biology*. – 2024. – Vol. 46, No. 11. – P. 11729–11748. – DOI: 10.3390/cimb46110697.
17. Sozcu S., Frajova J., Wiener J., Venkataraman M., Tomkova B., Militky J. Effect of drying methods on the thermal and mechanical behavior of bacterial cellulose aerogel // *Gels*. – 2024. – Vol. 10, No. 7. – Art. 474. – DOI: 10.3390/gels10070474.
18. Liang S. Advances in drug delivery applications of modified bacterial cellulose-based materials // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. – 2023. – Vol. 11. – Art. 1252706. – DOI: 10.3389/fbioe.2023.1252706.
19. Bodea I.M., Beteg F.I., Pop C.R., David A.P., Dudescu M.C., Vilău C., Stănilă A., Rotar A.M., Cătușescu G.M. Optimization of moist and oven-dried bacterial cellulose production for functional properties // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13, No. 13. – Art. 2088. – DOI: 10.3390/polym13132088.
20. Hu J., Wang L., Xiao M., Chen W., Zhou M., Hu Y., Zhang Y., Lai M., He A., Zhao M. Insights into bacterial cellulose for adsorption and sustained-release mechanism of flavors // *Food Chemistry X*. – 2024. – Vol. 25. – Art. 102110. – DOI: 10.1016/j.fochx.2024.102110.
21. Nikbakht A., van Zyl E.M., Larson S., Fenlon S., Coburn J.M. Bacterial cellulose purification with non-conventional, biodegradable surfactants // *Polysaccharides*. – 2024. – Vol. 5. – P. 857–871. – DOI: 10.3390/polysaccharides5040053.
22. Li Z., Chen S.Q., Cao X., Li L., Zhu J., Yu H. Effect of pH buffer and carbon metabolism on the yield and mechanical properties of bacterial cellulose produced by *Komagataeibacter hansenii* ATCC 53582 // *Journal of Microbiology and Biotechnology*. – 2021. – Vol. 31, No. 3. – P. 429–438. – DOI: 10.4014/jmb.2010.10054.
23. Yang Z., Wang F., Shi C., Huang J., Xu R., Quan L., Li Y., Sun Q., Wang H., Huang R., Zheng B., Li Y. Functionalized bacterial cellulose bottlebrush-based asymmetric dressing for effective management of wounds with infection and exudate // *Small Science*. – 2023. – Vol. 3, No. 12. – Art. 2300138. – DOI: 10.1002/smsc.202300138.
24. Rahmadiawan D., Abral H., Azka M.A., Sapuan S.M., Admi R.I., Shi S.C., Zainul R., Azril, Zikri A., Mahardika M. Enhanced properties of TEMPO-oxidized bacterial cellulose films via eco-friendly non-pressurized hot water vapor treatment for sustainable and smart food packaging // *RSC Advances*. – 2024. – Vol. 14, No. 40. – P. 29624–29635. – DOI: 10.1039/d4ra06099g.
25. Castanho N.R.C.M., de Marco N., Caetano É.L.A., Alves P.L.M., Pickler T.B., Ibanez N.L.A., Jozala A.F., Grotto D. Exploring bacterial cellulose and a biosurfactant as eco-friendly strategies for addressing pharmaceutical contaminants // *Molecules*. – 2024. – Vol. 29, No. 2. – Art. 448. – DOI: 10.3390/molecules29020448.
26. Ponjavic M., Filipovic V., Topakas E., Karnaouri A., Zivkovic J., Krgovic N., Mudric J., Savikin K., Nikodinovic-Runic J. Two-step upcycling process of lignocellulose into edible bacterial nanocellulose with black raspberry extract as an active ingredient // *Foods*. – 2023. – Vol. 12, No. 16. – Art. 2995. – DOI: 10.3390/foods12162995.
27. Vasconcelos N.F., Chevallier P., Mantovani D., Rosa M.F., Barros F.J.S., Andrade F.K., Vieira R.S. Oxidized bacterial cellulose membranes immobilized with papain for dressing applications: physicochemical and in vitro biological properties // *Pharmaceutics*. – 2024. – Vol. 16, No. 8. – Art. 1085. – DOI: 10.3390/pharmaceutics16081085.
28. Kaczmarek M., Białkowska A.M. Enzymatic functionalization of bacterial nanocellulose: current approaches and future prospects // *Journal of Nanobiotechnology*. – 2025. – Vol. 23, No. 1. – Art. 82. – DOI: 10.1186/s12951-025-03163-x.
29. Liebner F., Haimer E., Wendland M., Neouze M.A., Schluffer K., Miethe P., Heinze T., Potthast A., Rosenau T. Aerogels from unaltered bacterial cellulose: application of scCO<sub>2</sub> drying for the preparation of shaped, ultra-lightweight cellulosic aerogels // *Macromolecular Bioscience*. – 2010. – Vol. 10, No. 4. – P. 349–352. – DOI: 10.1002/mabi.200900371.
30. Horue M., Silva J.M., Berti I.R., Brandão L.R., Barud H.D.S., Castro G.R. Bacterial cellulose-based materials as dressings for wound healing // *Pharmaceutics*. – 2023. – Vol. 15, No. 2. – Art. 424. – DOI: 10.3390/pharmaceutics15020424.
31. Pigaleva M.A., Bulat M.V., Gromovych T.I., Gavryushina I.A., Lutsenko S.V., Gallyamov M.O., Novikov I.V., Buyanovskaya A.G., Kiselyova O.I. A new approach to purification of bacterial cellulose membranes: what happens to bacteria in supercritical media? // *Journal of Supercritical Fluids*. – 2019. – Vol. 147. – P. 59–69. – DOI: 10.1016/j.supflu.2019.02.009.
32. Saleh A.K., El-Gendi H., Soliman N.A., El-Zawawy W.K., Abdel-Fattah Y.R. Bioprocess development for bacterial cellulose biosynthesis by novel *Lactiplantibacillus plantarum* isolate along with characterization and antimicrobial assessment of fabricated membrane // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12, No. 1. – Art. 2181. – DOI: 10.1038/s41598-022-06117-7.
33. Santos S.M., Carbajo J.M., Quintana E., Ibarra D., Gomez N., Ladero M., Eugenio M.E., Villar J.C. Characterization of purified bacterial cellulose focused on its use on paper restoration // *Carbohydrate Polymers*. – 2015. – Vol. 116. – P. 173–181. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.03.064.

34. Kumar M., Kumar V., Saran S. Efficient production of bacterial cellulose-based composites using zein protein extracted from corn gluten meal // *Journal of Food Science and Technology*. – 2023. – Vol. 60, No. 3. – P. 1026–1035. – DOI: 10.1007/s13197-022-05443-y.
35. Anguluri K., La China S., Brugnoli M., Cassanelli S., Gullo M. Better under stress: improving bacterial cellulose production by *Komagataeibacter xylinus* K2G30 (UMCC 2756) using adaptive laboratory evolution // *Frontiers in Microbiology*. – 2022. – Vol. 13. – Art. 994097. – DOI: 10.3389/fmicb.2022.994097.
36. Hasanin M.S., Abdelraof M., Hashem A.H., Mohamed A.A., El-Sakhawy M., Abdel-Mohsen A.M. Sustainable bacterial cellulose production by *Achromobacter* using mango peel waste // *Microbial Cell Factories*. – 2023. – Vol. 22. – Art. 24. – DOI: 10.1186/s12934-023-02031-3.
37. Mikkelsen D., Flanagan B.M., Dykes G.A., Gidley M.J. Influence of different carbon sources on bacterial cellulose production by *Gluconacetobacter xylinus* strain ATCC 53524 // *Journal of Applied Microbiology*. – 2009. – Vol. 107, No. 2. – P. 576–583. – DOI: 10.1111/j.1365-2672.2009.04226.x.
38. Montenegro-Silva P., Ellis T., Dourado F., Ferreira E.C., Freitas F., Reis M.A.M. Enhanced bacterial cellulose production in *Komagataeibacter sucrofermentans*: impact of different PQQ-dependent dehydrogenase knockouts and ethanol supplementation // *Biotechnology for Biofuels*. – 2024. – Vol. 17. – Art. 35. – DOI: 10.1186/s13068-024-02482-9.
39. Amorim J., Liao K., Mandal A., Costa A.F.S., Roumeli E., Sarubbo L.A. Impact of carbon source on bacterial cellulose network architecture and prolonged lidocaine release // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, No. 21. – Art. 3021. – DOI: 10.3390/polym16213021.
40. Chen S.Q., Meldrum O.W., Liao Q., Li Z., Cao X., Guo L., Zhang S., Zhu J., Li L. The influence of alkaline treatment on the mechanical and structural properties of bacterial cellulose // *Carbohydrate Polymers*. – 2021. – Vol. 271. – Art. 118431. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2021.118431.
41. Zhang S., Xu J. Multi-strain synergistic fermentation of waste biomass with bacterial cellulose fermentation wastewater to prepare sustainable detergents // *Bioprocess and Biosystems Engineering*. – 2025. – Vol. 48, No. 7. – P. 1221–1238. – DOI: 10.1007/s00449-025-03172-y.
42. Ybañez M.G. Jr., Camacho D.H. Designing hydrophobic bacterial cellulose film composites assisted by sound waves // *RSC Advances*. – 2021. – Vol. 11, No. 52. – P. 32873–32883. – DOI: 10.1039/d1ra02908h.
43. Piwowarek K., Lipińska E., Kieliszek M. Reprocessing of side-streams towards obtaining valuable bacterial metabolites // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2023. – Vol. 107, No. 7–8. – P. 2169–2208. – DOI: 10.1007/s00253-023-12458-8.
44. Da Silva Pereira E.H., Mojicevic M., Tas C.E., Lanzagorta Garcia E., Brennan Fournet M. Targeting bacterial nanocellulose properties through tailored downstream techniques // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, No. 5. – Art. 678. – DOI: 10.3390/polym16050678.
45. Malcı K., Li I.S., Kisseroudis N., Ellis T. Modulating microbial materials – engineering bacterial cellulose with synthetic biology // *ACS Synthetic Biology*. – 2024. – Vol. 13, No. 12. – P. 3857–3875. – DOI: 10.1021/acssynbio.4c00615.
46. Nagtode V.S., Cardoza C., Yasin H.K.A., Mali S.N., Tambe S.M., Roy P., Singh K., Goel A., Amin P.D., Thorat B.R., Cruz J.N., Pratap A.P. Green surfactants (biosurfactants): a petroleum-free substitute for sustainability – comparison, applications, market, and future prospects // *ACS Omega*. – 2023. – Vol. 8, No. 13. – P. 11674–11699. – DOI: 10.1021/acsomega.3c00591.
47. Yıldırım M., Erşatır M., Poyraz S., Amangeldinova M., Kudrina N.O., Terletskaia N.V. Green extraction of plant materials using supercritical CO<sub>2</sub>: insights into methods, analysis, and bioactivity // *Plants*. – 2024. – Vol. 13, No. 16. – Art. 2295. – DOI: 10.3390/plants13162295.
48. Seeger J., Zäh M., Wendisch V.F., Brandenbusch C., Henke N.A. Supercritical carbon dioxide extraction of astaxanthin from *Corynebacterium glutamicum* // *Bioresources and Bioprocessing*. – 2025. – Vol. 12, No. 1. – Art. 46. – DOI: 10.1186/s40643-025-00882-9.
49. Joseph A., Umamaheswari S., Vassou M.C. Bacterial cellulose: a versatile biomaterial for biomedical application // *Carbohydrate Research*. – 2025. – Vol. 552. – Art. 109350. – DOI: 10.1016/j.carres.2024.109350.
50. Picheth G.F., Pirich C.L., Sierakowski M.R., Woehl M.A., Sakakibara C.N., de Souza C.F., Martin A.A., da Silva R., de Freitas R.A. Bacterial cellulose in biomedical applications: a review // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2017. – Vol. 104, Pt A. – P. 97–106. – DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2017.05.171.
51. Tranquilan-Aranilla C., Flores J., Gallardo A.K., Abrera G., Pares F. Radiation processing of bacterial cellulose-monolaurin wound dressing: physicochemical effects, functional analysis, and sterilization // *Journal of Biomaterials Applications*. – 2024. – Vol. 38, No. 6. – P. 721–732. – DOI: 10.1177/08853282231219276.
52. Pasaribu K.M., Gea S., Ilyas S., Tamrin T., Radecka I. Characterization of bacterial cellulose-based wound dressing in different order impregnation of chitosan and collagen // *Biomolecules*. – 2020. – Vol. 10, No. 11. – Art. 1511. – DOI: 10.3390/biom10111511.
53. Lin D., Liu Z., Shen R., Chen S., Yang X. Bacterial cellulose in food industry: current research and future prospects // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2020. – Vol. 158. – P. 1007–1019. – DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.04.230.
54. Chen Q., Yang F., Hou Y., Li Z., Yuan D., Liu C., Hu F., Zhao R., Wang H., Liu W., Zhang F., Wang Q., Yu D. Bacterial cellulose-based Pickering emulsions reinforced with silver and silica nanoparticles for advanced antibacterial and hydrophobic food packaging solutions // *Carbohydrate Polymers*. – 2025. – Vol. 355. – Art. 123357. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2025.123357.
55. Raut M.P., Asare E., Syed Mohamed S.M.D., Amadi E.N., Roy I. Bacterial cellulose-based blends and composites: versatile biomaterials for tissue engineering applications // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2023. – Vol. 24, No. 2. – Art. 986. – DOI: 10.3390/ijms24020986.
56. Wang J., Tavakoli J., Tang Y. Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods – a review // *Carbohydrate Polymers*. – 2019. – Vol. 219. – P. 63–76. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.05.008.

57. Jin K., Jin C., Wu Y. Synthetic biology-powered microbial co-culture strategy and application of bacterial cellulose-based composite materials // *Carbohydrate Polymers*. – 2022. – Vol. 283. – Art. 119171. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.119171.
58. Zheng L., Li S., Luo J., Wang X. Latest advances on bacterial cellulose-based antibacterial materials as wound dressings // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. – 2020. – Vol. 8. – Art. 593768. – DOI: 10.3389/fbioe.2020.593768.
59. Blanco F.G., Hernández N., Rivero-Buceta V., Maestro B., Sanz J.M., Mato A., Hernández-Arriaga A.M., Prieto M.A. From residues to added-value bacterial biopolymers as nanomaterials for biomedical applications // *Nanomaterials*. – 2021. – Vol. 11, No. 6. – Art. 1492. – DOI: 10.3390/nano11061492.
60. Kadier A., Ilyas R.A., Huzafah M.R.M., Harihastuti N., Sapuan S.M., Harussani M.M., Azlin M.N.M., Yuliasni R., Ibrahim R., Atikah M.S.N., Wang J., Chandrasekhar K., Islam M.A., Sharma S., Punia S., Rajasekar A., Asyraf M.R.M., Ishak M.R. Use of industrial wastes as sustainable nutrient sources for bacterial cellulose (BC) production: mechanism, advances, and future perspectives // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13, No. 19. – Art. 3365. – DOI: 10.3390/polym13193365.
61. Ma S., Xi G., Feng X., Zhang H., Li X., Xian M. Bio-synthesis of bacterial cellulose from ramie textile waste for high-efficiency Cu(II) adsorption // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – Art. 18715. – DOI: 10.1038/s41598-025-02310-6.
62. Peña-Ortiz M., García A., Martirani-Von Abercron S.M., Marin P., Marqués S., Khiari R., Dufresne A., Serrano L. Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from bacterial cellulose synthesized via *Ancylobacter* sp. STN1A using residual glycerol // *Polymers*. – 2025. – Vol. 17. – Art. 1240. – DOI: 10.3390/polym17091240.
63. Foroughi F., Rezvani Ghomi E., Morshedi Dehaghi F., Borayek R., Ramakrishna S. A review on the life cycle assessment of cellulose: from properties to the potential of making it a low carbon material // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, No. 4. – Art. 714. – DOI: 10.3390/ma14040714.
64. Magalhães S., Fernandes C., Pedrosa J.F.S., Alves L., Medronho B., Ferreira P.J.T., Rasteiro M.D.G. Eco-friendly methods for extraction and modification of cellulose: an overview // *Polymers*. – 2023. – Vol. 15, No. 14. – Art. 3138. – DOI: 10.3390/polym15143138.
65. Ferro M., Mannu A., Panzeri W., Theeuwes C.H.J., Mele A. An integrated approach to optimizing cellulose mercerization // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12, No. 7. – Art. 1559. – DOI: 10.3390/polym12071559.
66. Gao M., Li J., Bao Z., Hu M., Nian R., Feng D., An D., Li X., Xian M., Zhang H. A natural in situ fabrication method of functional bacterial cellulose using a microorganism // *Nature Communications*. – 2019. – Vol. 10, No. 1. – Art. 437. – DOI: 10.1038/s41467-018-07879-3.
67. Turossi T.C., Júnior H.L.O., Monticeli F.M., Dias O.T., Zattera A.J. Cellulose-derived battery separators: a minireview on advances towards environmental sustainability // *Polymers*. – 2025. – Vol. 17, No. 4. – Art. 456. – DOI: 10.3390/polym17040456.
68. Taokaew S. Bacterial nanocellulose produced by cost-effective and sustainable methods and its applications: a review // *Fermentation*. – 2024. – Vol. 10. – Art. 316. – DOI: 10.3390/fermentation10060316.
69. Mandal M., Roy A., Mitra D., Sarkar A. Possibilities and prospects of bioplastics production from agri-waste using bacterial communities: finding a silver-lining in waste management // *Current Research in Microbial Sciences*. – 2024. – Vol. 7. – Art. 100274. – DOI: 10.1016/j.crmicr.2024.100274.
70. Römling U., Galperin M.Y. Bacterial cellulose biosynthesis: diversity of operons, subunits, products, and functions // *Trends in Microbiology*. – 2015. – Vol. 23, No. 9. – P. 545–557. – DOI: 10.1016/j.tim.2015.05.005.
71. Masek A., Kosmalska A. Technological limitations in obtaining and using cellulose biocomposites // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. – 2022. – Vol. 10. – Art. 912052. – DOI: 10.3389/fbioe.2022.912052.
72. Augimeri R.V., Varley A.J., Strap J.L. Establishing a role for bacterial cellulose in environmental interactions: lessons learned from diverse biofilm-producing proteobacteria // *Frontiers in Microbiology*. – 2015. – Vol. 6. – Art. 1282. – DOI: 10.3389/fmicb.2015.01282.
73. Gomes R.J., Ida E.I., Spinosa W.A. Bacterial cellulose production by *Komagataeibacter hansenii* can be improved by successive batch culture // *Brazilian Journal of Microbiology*. – 2023. – Vol. 54, No. 2. – P. 703–713. – DOI: 10.1007/s42770-023-00910-w.
74. Naomi R., Bt Hj Idrus R., Fauzi M.B. Plant- vs. bacterial-derived cellulose for wound healing: a review // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2020. – Vol. 17, No. 18. – Art. 6803. – DOI: 10.3390/ijerph17186803.
75. Skiba E.A., Shavyrkina N.A., Budaeva V.V., Sitnikova A.E., Korchagina A.A., Bychin N.V., Gladysheva E.K., Pavlov I.N., Zharikov A.N., Lubyansky V.G., Semyonova E.N., Sakovich G.V. Biosynthesis of bacterial cellulose by extended cultivation with multiple removal of BC pellicles // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13, No. 13. – Art. 2118. – DOI: 10.3390/polym13132118.
76. Dáger-López D., Chenché Ó., Ricaurte-Párraga R., Núñez-Rodríguez P., Bazaña J.M., Fiallos-Cárdenas M. Advances in the production of sustainable bacterial nanocellulose from banana leaves // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, No. 8. – Art. 1157. – DOI: 10.3390/polym16081157.
77. Zhong C. Industrial-scale production and applications of bacterial cellulose // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. – 2020. – Vol. 8. – Art. 605374. – DOI: 10.3389/fbioe.2020.605374.
78. Ul-Islam M., Ul-Islam S., Yasir S., Fatima A., Ahmed M.W., Lee Y.S., Manan S., Ullah M.W. Potential applications of bacterial cellulose in environmental and pharmaceutical sectors // *Current Pharmaceutical Design*. – 2020. – Vol. 26, No. 45. – P. 5793–5806. – DOI: 10.2174/1381612826666201008165241.
79. Li W., Huang X., Liu H., Lian H., Xu B., Zhang W., Sun X., Wang W., Jia S., Zhong C. Improvement in bacterial cellulose production by co-culturing *Bacillus cereus* and *Komagataeibacter xylinus* // *Carbohydrate Polymers*. – 2023. – Vol. 313. – Art. 120892. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2023.120892.
80. Singh A., Walker K.T., Ledesma-Amaro R., Ellis T. Engineering bacterial cellulose by synthetic biology // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2020. – Vol. 21, No. 23. – Art. 9185. – DOI: 10.3390/ijms21239185.

81. Vasili E., Azimi B., Raut M.P., Gregory D.A., Mele A., Liu B., Römhild K., Krieg M., Claeysens F., Cinelli P., Roy I., Seggiani M., Danti S. A green method for bacterial cellulose electrospinning using 1-butyl-3-methylimidazolium acetate and  $\gamma$ -valerolactone // *Polymers*. – 2025. – Vol. 17, No. 9. – Art. 1162. – DOI: 10.3390/polym17091162.
82. Utoiu E., Manoiu V.S., Oprita E.I., Craciunescu O. Bacterial cellulose: a sustainable source for hydrogels and 3D-printed scaffolds for tissue engineering // *Gels*. – 2024. – Vol. 10, No. 6. – Art. 387. – DOI: 10.3390/gels10060387.
83. Shishparenok A.N., Furman V.V., Dobryakova N.V., Zhdanov D.D. Protein immobilization on bacterial cellulose for biomedical application // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, No. 17. – Art. 2468. – DOI: 10.3390/polym16172468.
84. Aditya T., Allain J.P., Jaramillo C., Restrepo A.M. Surface modification of bacterial cellulose for biomedical applications // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2022. – Vol. 23, No. 2. – Art. 610. – DOI: 10.3390/ijms23020610.
85. Zhantlessova S., Savitskaya I., Kistaubayeva A., Ignatova L., Talipova A., Pogrebnyak A., Digel I. Advanced “green” prebiotic composite of bacterial cellulose/pullulan based on synthetic biology-powered microbial coculture strategy // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, No. 15. – Art. 3224. – DOI: 10.3390/polym14153224.
86. Loh J., Arnardottir T., Gilmour K., Zhang M., Dade-Robertson M. Enhanced production of bacterial cellulose with a mesh dispenser vessel-based bioreactor // *Cellulose*. – 2025. – Vol. 32, No. 4. – P. 2209–2226. – DOI: 10.1007/s10570-024-06367-w.
87. Barja F. Bacterial nanocellulose production and biomedical applications // *Journal of Biomedical Research*. – 2021. – Vol. 35, No. 4. – P. 310–317. – DOI: 10.7555/JBR.35.20210036.

**Авторлар туралы мәлімет:**

Турганова Ронагуль Адилжановна – агроғылымдар бойынша PhD докторы, Лотарингия университеті (Нанси, Франция, e-mail: ronagul.turganova@gmail.com).

Тулеева Рысгуль Нурлановна – докторант, органикалық заттар, табиғи қосылыстар және полимерлер химиясы мен технологиясы кафедрасы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан, e-mail: rysgultuleyeva@gmail.com).

**Information about authors:**

Turganova Ronagul Adiljanovna – PhD in AgroSciences, University of Lorraine(Nancy, France, e-mail: ronagul.turganova@gmail.com).

Tuleyeva Rysgul Nurlanovna – PhD student at the Department of Chemistry and Technology of Organic Substances, Natural Compounds, and Polymers, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: rysgultuleyeva@gmail.com).

**Сведения об авторах:**

Турганова Ронагуль Адилжановна – PhD по агронаукам, Университет Лотарингии (Нанси, Франция, e-mail: ronagul.turganova@gmail.com).

Тулеева Рысгуль Нурлановна – докторант кафедры химии и технологии органических веществ, природных соединений и полимеров Казахского национального университета им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: rysgultuleyeva@gmail.com).

2025 жылдың 24 шілдесінде келіп түсті.  
2025 жылдың 25 желтоқсанында қабылданды.